

沈方铝, 陈伟, 陈为伟. 剪切波速在福州地铁6号线场地分类中的应用[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 54–60. [SHEN Fanglv, CHEN Wei, CHEN Weiwei. The Application of Shear Wave Velocity in the Site Classification of Fuzhou Metro Line 6[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 54–60]

剪切波速在福州地铁6号线场地分类中的应用

沈方铝, 陈 伟, 陈为伟
(福建省地震局, 福州 350001)

摘要: 剪切波速是结构抗震设计中确定地震动参数的重要依据。利用福州地铁6号线沿线场地各土层剪切波速数据, 给出福州地铁6号线沿线六类土层的949个测点的剪切波速统计分析及土层纵向变化情况。用三种不同规范计算不同深度范围内的等效剪切波速, 对地铁沿线场地进行类别划分和对比, 有助于6号线地铁建设乃至未来福州市地铁6号线沿线区域的工程建设。

关键词: 剪切波速; 场地分类; 等效剪切波速; 地铁

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2018)04-0054-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.010

The Application of Shear Wave Velocity in the Site Classification of Fuzhou Metro Line 6

SHEN Fanglv, CHEN Wei, CHEN Weiwei
(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350001, China)

Abstract: Shear wave velocity is an important basis for determining ground motion parameters in structural seismic design. By using the shear wave velocity data of each soil layer along the Fuzhou metro line 6, the paper statistically analyzes the shear wave velocity and the longitudinal variation of 949 points in the six types of soil layers along the Fuzhou metro line 6. The paper calculates the equivalent shear wave velocity in different depth ranges by using three different specifications, classifies and contrasts the venues along the subway, which helps the construction of the metro line 6 and future construction of the area along the line 6.

Keywords: Shear wave velocity; Site classification; Equivalent shear wave velocity; Subway

收稿日期: 2018-10-10

作者简介: 沈方铝(1983-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事工程地震及地球物理探测工作。

E-mail: shen_fl@sina.com.

0 引言

土层剪切波速是划分场地土类型及建筑场地类别的重要指标,也是场地土层地震反应分析的重要参数^[1]。剪切波速作为场地类别划分的一项重要指标,已被国内外广泛采用,并与场地覆盖层厚度一起作为场地分类的主要指标。例如,邱海容^[2]研究了泉州市区场地各主要土层剪切波速的数理统计特征和场地土等效剪切波速的分布规律,刘红帅等对常规土类剪切波速与埋深的关系进行了分析,董菲蕃等^[4]对福建沿海3个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系做了研究,均取得了显著成效。

但在剪切波速的具体计算中,采用多大的深度范围来计算该深度范围内的所有土层的剪切波速加权平均值作为场地等效剪切波速值,中国的现行规范和欧洲、美国等一些国家的规范具有一定的区别:如建筑抗震设计规范(GB 50011-2016)^[5]在确定场地类别时,是取地表以下20 m深度范围内岩土层的等效剪切波速值($V_s 20$)和覆盖层厚度作为工程场地分类指标的。GB50111-2006《铁路工程抗震设计规范》^[6]取地面或一般冲刷线以下25 m,并不得小于基础底面以下10 m计算等效剪切波速。而欧洲、美国等一些国家和中国的台湾地区则多以地表以下30 m深度内岩土层的加权平均剪切波速($V_s 30$)作为场地类别划分和评估的重要指标,如美国IBC2003规范(黄雅虹等^[7]对工程场地分类中等效剪切波速计算深度问题的讨论;蔡辉腾等^[8]运用美国FEMA编制的NEHRP(2000)对福州市区场地类别划分的初步研究)。

福州地铁6号线全程四十余公里,起于福州市仓山区的会展中心,沿福泉高速延伸,经过东部新城,在三江口附近与拟建的道庆州大桥共线,跨越乌龙江后沿203省道延伸,进入长乐市区后沿海峡路、郑和路、东鹤路延伸,下穿北山后进入长乐市郊区,沿道庆路、漳江大道进入漳港镇,线路终于长乐机场。区间穿越海陆交互沉积平原、丘间冲洪积谷地、丘陵等多种地貌,基岩有火山岩、侵入岩,发育多条断裂,全线软土较为发育,砂土有液化趋势,工程地质条件、水文地质条件中等复杂。

本文利用福州地铁6号线沿线场地各土层剪切波速数据,给出福州地铁6号线沿线六类土层的949个测点的剪切波速统计分析及其土层纵向变化情况,分别利用三种规范计算20 m、25 m、

30 m深度范围内的等效剪切波速,对地铁沿线场地进行类别判断和对比,为未来福州市地铁6号线沿线的工程规划与建设提供参考。

1 地质概况

1.1 地形地貌

沿线场地地貌单元主要为冲海积盆地、平原地貌单元以及侵蚀剥蚀低丘、台地地貌单元。冲、海积的平原、盆地和阶地等地形分布于丘陵间或沿海港湾、河口地带,地势低平,海拔高程多在10 m以下。剥蚀残丘地貌单元地势起伏较大。冲海积-海陆交互相地貌单元地形较平坦,相对高差较小,沿线下穿乌龙江、营前河、池塘等,线路地面条件也较复杂,有村庄、公路、小区、商铺、密集果树林、市政管线等。

1.2 地质构造

福州地铁6号线工程场地位于区域性的北北东—北东向长乐—诏安断裂带和北西向闽江断裂带的交汇区,断裂大部分为前第四纪或第四纪早期断裂,仅有少数的北北西—北西向断裂至晚更新世早期仍有活动。在新构造运动分区上,工程场地位于闽东沿海差异隆起区内,该区总体呈缓慢的抬升状态。

1.3 地层及侵入岩分布特征

场地地表普遍覆盖第四系,基岩有侏罗系、燕山期侵入岩及喜山期侵入岩。第四系主要分布于福州盆地、闽江两岸、沿海平原和山前地带,主要有更新统残积层,上更新统冲洪积层、冲—海积层,全新统海积层、冲积层、冲—海积或冲洪积层等。

(1)更新统残积层(Qp^d):分布于长乐古槐北的低丘、台地上,主要由粘土、砂粘土、粘砂土等组成。该层属亚热带高岭土型风化壳的一部份,主要由花岗岩、火山岩类岩石经长期风化而成,与原岩呈过渡关系。

(2)上更新统冲洪积层(Qp_3^{al}):分布于长乐玉田附近,主要由黄、褐黄色泥质砂砾卵石层夹粘质砂土、砂质粘土及粘土等组成,厚约6~35 m。

(3)全新统海积层(Qh^m):分布于福州盆地、长乐古槐—漳港的沿海低平地方,组成海积平原或一级海积阶地,一般标高2~5 m,最高不超过

10 m。岩性为淤泥、粉砂质淤泥、砂质粘土、砂、泥炭等,厚达 68 m。

(4)全新统冲积层(Qh^d):闽江流域构成心滩、岸滩。由粉细砂、砂粘土、粘质砂土夹粗砂、砾石等组成。

(5)全新统冲洪积层(Qh^{d+pl}):零星出露于山涧盆地或山前地带,由含砾粘质砂土或砂质粘土及松散砂砾层组成,厚约 1~7 m。

(6)侏罗系(J):主要分布于剥蚀残丘地貌的晚

侏罗世(J_3)火山岩:岩性主要为深灰色英安质熔结凝灰岩、安山岩、英安质角砾熔岩、凝灰岩、流纹质凝灰岩等。

(7)燕山期侵入岩及喜山期侵入岩:主要分布于剥蚀残丘地貌的燕山期侵入的花岗岩(γ_s)、闪长岩、花岗斑岩及喜山期形成的辉绿岩(β)等。

典型场地钻孔工程地质纵断面图见图 1,具体地理位置见图 2。

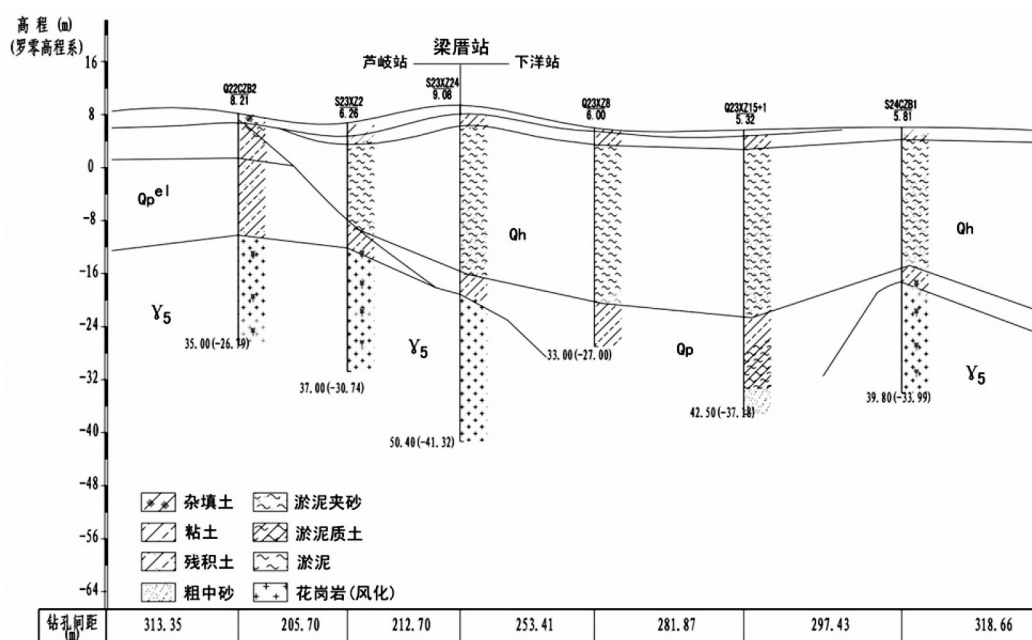


图 1 工程地质纵断面图

Fig1 Longitudinal profile of engineering geological bore hole

2 地铁沿线剪切波速测试及分析

2.1 地铁沿线剪切波速测试

剪切波速测试的基本原理就是利用弹性波在介质中的传播速度与介质的剪切模量、泊松比、弹性模量等土体性质的关系,通过测点剪切波速来求出介质的弹性参数。本文中主要使用国产 XG-I 悬挂式波速测井仪及其配套的三分量检测波器,所测得的波速对应于两道接收检波器(相距 1 m)所在的平均深度。

对福州地铁 6 号线 20 座车站、停车列检库和站点间等工程场地的钻孔 MFZ1-01~MFZ1-23 (共计 23 个孔)进行了场地土层剪切波速现场测试和数据处理,收集站点及区间段沿线剪切波速测试

钻孔 11 个(部分由福州市勘测院提供)。

2.2 场地不同土类剪切波速的特征统计分析

对得到的剪切波速数据进行了初步的筛选,剔除了明显远超正常值的数据,并对剩下的土类进行合并分析,分为六类:①杂填土类、②淤泥类、③淤泥质土、④粉质粘土类、⑤砂土类(粉砂、含泥中细砂、中粗砂)和⑥卵石类(填石、孤石、卵石、含泥角砾等)。同时,对六类土的测点数、埋深状况、最大层位厚度、剪切波速范围等进行了数值统计,结果见表 1。

从表 3 可以看出六类土的剪切波速不同的分布特征及内在规律:

(1)福州地铁 6 号线沿线杂填土的剪切波速基本小于 150 m/s,均值 133 m/s,标准差 16.55。

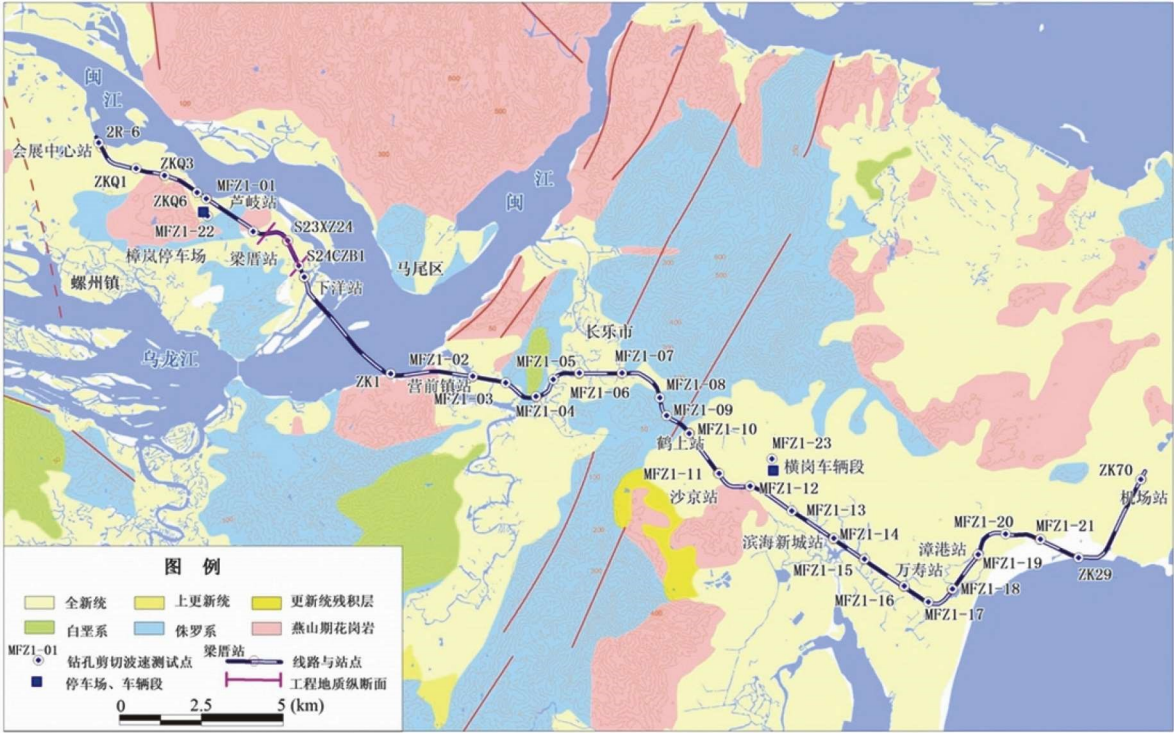


图2 福州地铁6号线场地地质及钻孔位置
Fig2 The bore location plan of Fuzhou metro line 6

表1 土层测点分布及剪切波速特征统计表
Table1 Data statistics of test point and variation of shear wave velocity

土类	数组	测点	埋深/m		厚度 Max	剪切波速范围测点数(个)				剪切波速/(m·s ⁻¹)			标准差
			min	max		$V_s \leq 150$	$150 < V_s \leq 250$	$250 < V_s \leq 500$	$V_s > 500$	Min	Max	\bar{V}	
杂填土	26	63	0	6.8	6.8	55	8	/	/	94	173	133	16.55
淤泥	21	208	0.9	27.4	25.5	147	61	/	/	80	192	114	19.95
淤质土	15	144	1.2	48.6	25.1	14	119	11	/	86	287	196	42.17
粉粘类	39	208	0	56.7	19.8	21	63	124	/	122	376	252	63.24
砂类	20	234	0.8	60.2	28.7	36	159	39	/	120	347	202	53.9
卵石类	17	92	0	58	15.2	0	5	76	11	151	568	396	85.51

(2) 沿线连续分布淤泥层,厚度变化大,最小埋深0.9 m,最大埋深为27.4 m,最小层厚1.1 m,最大厚度达25.5 m,平均波速为114 m/s,且71%的测点剪切波速小于150 m/s,小部分波速偏大的样点一般含砂较多。

(3) 沿线淤泥质土为流塑,饱和,成分以粘粒为主,埋深大部分超过20 m,最深达48.6 m,剪切波速基本小于250 m/s,均值为196 m/s,标准差42.17。

(4) 福州地区广泛分布粉质粘土,6号线沿线粉质粘土以可塑状为主,局部硬塑状,以中硬土为主,中软土次之。埋深0~56.7 m,最大厚度

19.8 m,部分钻孔揭露有两层,计有39组粉质粘土208个测点,剪切波速平均值为252 m/s,标准差63.24。

(5) 沿线砂类以稍密和中密为主,局部混有少量淤泥,以中硬土为主,埋深0.8~60.2 m,最大厚度28.7 m,234个测点剪切波速平均值为202 m/s,标准差63.24。

(6) 卵石类埋深在0~58 m间,最大层厚度15.2 m,92个测点剪切波速平均值为396,标准差85.51,大部分测点波速在 $500 \geq V_s > 250$ 间,11个测点大于500 m/s。

2.3 等效剪切波速测试结果分析

依据三种不同规范要求分别进行计算,即依据 GB 50011-2016《建筑抗震设规范》(以下简称建规),对 34 个钻孔的 20 m 等效剪切波速 V_{sc} (m/s)进行了计算;依据 GB50111-2006《铁路工程抗震设计规范》(以下简称铁规)计算深度选取地面或一般冲刷线以下 25 m,并不小于基础底面以下 10 m。

由地铁 6 号线设计知,站点底板埋深大致 15 m 左右,因此场地类别计算深度 H 均取地面下 25 m 后计算了 25 m 后计算了 34 个孔的 25 m 的等效剪切波速 V_{sc} (m/s);依据美国 IBC2003 规范(以下简称美规)计算 30 m 等效剪切波速(个别孔位由于中风化埋深较浅,故钻探深度没有达到 30 m 的实测波速已经大于 800 m/s,所以统一给定 900 m/s 的剪切波速补足 30 m)。计算结果统计如下表 2、图 3。

表 2 三种规范场地类别分类结果差异表
Table2 The site classification difference between three method

钻孔号	覆盖层厚度	场地类别			等效剪切波速			波速与建规相比	
		建规	铁规	美规	建规	铁规	美规	铁差值	美差值
2R-6	72.1	Ⅲ	Ⅳ	E	116	132	139	16	23
ZKQ1	46.8	Ⅲ	Ⅳ	E	113	121	126	8	13
ZKQ3	21.1	Ⅲ	Ⅳ	E	112	136	160	24	48
ZKQ6	27.8	Ⅲ	Ⅳ	E	121	138	158	17	37
MFZ1-01	50.3	Ⅲ	Ⅳ	E	122	138	149	16	27
S23XZ24	31.3	Ⅲ	Ⅳ	E	119	128	140	9	21
S24XZ28	39.1	Ⅲ	Ⅳ	E	129	139	148	10	19
MFZ1-02	50.8	Ⅲ	Ⅳ	E	125	136	148	11	23
MFZ1-03	38.2	Ⅲ	Ⅳ	E	119	132	151	13	32
MFZ1-06	40	Ⅲ	Ⅳ	E	139	142	149	3	10
MFZ1-11	43.2	Ⅲ	Ⅳ	E	138	150	165	12	27
MFZ1-14	53.4	Ⅲ	Ⅳ	E	140	140	150	0	10
MFZ1-16	55	Ⅲ	Ⅳ	E	141	147	151	6	10
S24CZB1	31.7	Ⅲ	Ⅲ	E	146	173	173	27	27
MFZ1-05	40	Ⅲ	Ⅲ	E	144	167	167	23	23
MFZ1-07	32.4	Ⅲ	Ⅲ	E	147	173	173	26	26
MFZ1-19	73	Ⅲ	Ⅲ	E	174	168	168	-6	-6
MFZ1-23	73	Ⅲ	Ⅳ	D	107	115	193	8	86
ZK1	57.1	Ⅲ	Ⅲ	D	211	203	206	-8	-5
MFZ1-04	27.8	Ⅲ	Ⅲ	D	148	167	185	19	37
MFZ1-10	35.2	Ⅲ	Ⅲ	D	158	177	196	19	38
MFZ1-12	46.9	Ⅲ	Ⅲ	D	163	184	203	21	40
MFZ1-13	44	Ⅱ	Ⅲ	D	155	168	188	13	33
MFZ1-15	37	Ⅱ	Ⅲ	D	176	187	197	11	21
MFZ1-17	63	Ⅱ	Ⅲ	D	162	170	187	8	25
MFZ1-18	65	Ⅱ	Ⅲ	D	180	176	186	-4	6
MFZ1-20	21.2	Ⅱ	Ⅲ	D	176	176	231	0	55
MFZ1-21	51	Ⅱ	Ⅲ	D	174	184	184	10	10
MFZ1-22	21.7	Ⅱ	Ⅱ	D	279	308	340	29	61
ZK29	49.5	Ⅱ	Ⅲ	D	165	175	184	10	19
ZK70	40.1	Ⅱ	Ⅲ	D	159	169	184	10	25
MFZ1-08	12.4	Ⅱ	Ⅱ	C	389	356	392	-33	3
MFZ1-09	9	Ⅱ	Ⅱ	C	410	413	458	3	48
YKQ14	5.8	Ⅱ	Ⅱ	B	205	468	793	263	588

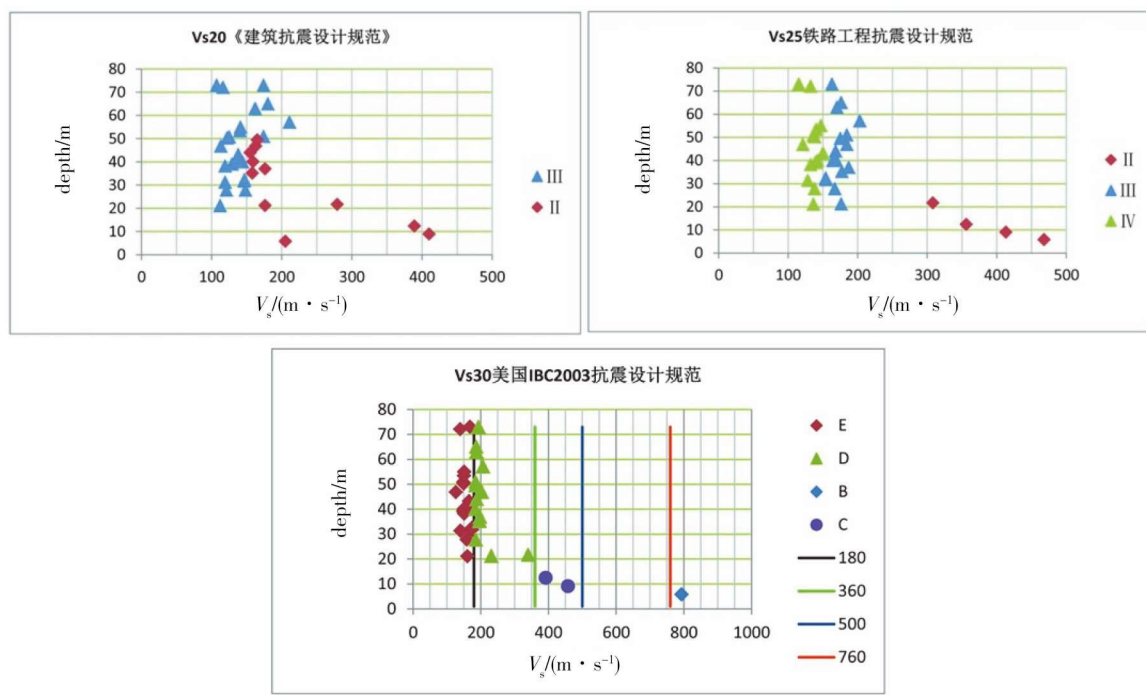
图3 V_s20 、 V_s25 、 V_s30 等效剪切波速及场地划分

Fig.3 The equivalent shearwave velocities and site classification calculated with the depth 20 m, 25 m, 30 m

GB 50011-2016《建筑抗震设计规范》在计算场地等效剪切波速时深度确定并非固定采用 20 m, 而是选取覆盖层厚度和 20 m 两者中的较小值。依据 GB50111-2006《铁路工程抗震设计规范》, 本场地取地面下 25 m 计算等效剪切波速, 而美国 IBC2003 规范则不考虑覆盖层厚度, 只是固定计算至 30 m 深度。因此, 与建规相比, 美规计算的大部分的等效剪切波速值都有一定程度的增大。对沿线一般中硬土地来说, 等效剪切波速平均提高了 74.5 m/s, 若剔除 YKQ14 孔的影响, 等效剪切波速平均提高了 27.8 m/s。从划分结果看, 判定场地的土性并不软, 场地类别划分为 D、C、B 类。对于沿线软弱土地, 由于建规只考虑 20 m 内的平均波速, 而福州地铁 6 号线沿线大部分场地地表 20 m 以下还有软土层, 有的还有软弱夹层或者多层软土相间, 而且相当多的场地下方有较厚的淤泥、淤泥混砂沉积, 形成软夹层, 美规计算 30 m 深, 将多层淤泥等软夹层的情况考虑进去了一大部分, 等效剪切波速平均提高了 25.7 m/s。福州市较厚的软土层, 必将使场地地震反应具有较长周期放大的情况, 这对长周期地铁结构有重要影响, 于是美规考虑得更为安全。

对于砂层较厚的场地来说, 如钻孔 MFZ1-20、MFZ1-22、MFZ1-23 孔大部覆盖层为砂层, 十几

二十米砂层以下直接为基岩或接近基岩场地, 美规的计算方法对等效剪切波速有很大的提高, 增加值为 55~86 m/s。同理, 对于覆盖层很薄的软土地(如 YKQ14), 美规方法的等效剪切波速更大, 增加值为 588 m/s。

3 结语

通过对福州地铁 6 号线沿线 949 个测点场地土层剪切波速的测试、分析和处理, 得到 6 种主要常见土层剪切波速的统计资料, 依此揭示场地土等效剪切波速的分布特征。

依据《建筑抗震设计规范》、《铁路工程抗震设计规范》和美国 IBC2003 规范三种规范对场地土等效剪切波速、场地土划分和场地类别评判进行了研究, 结论是:

(1) 福州地铁 6 号线沿线连续分布有淤泥层, 最小埋深 0.9~27.4 m, 层厚 1.1~25.5 m, 平均波速为 114 m/s, 对工程不利。以长乐市区为界, 地铁 6 号线西北部分沿线等效剪切波速普遍较东南沿线小, 这为相关区域的工程规划与建设提供了有用的资料。

(2) 与建规相比, 在覆盖层厚度<10 m 时, 铁规和美规将大厚度高波速的基岩层计算进去所得

等效剪切波速结果提高幅度较大。在覆盖层厚度在 20~30 m 内时,不同规范所计算结果差值随深度增加逐渐减小。相对来说,铁规计算的数据差异较小,美规计算的大部分的等效剪切波速值都有一定程度的增大,对于中硬土场地评判场地类别影响较小;对于软弱土场地,特别是 30 m 深范围有多层软弱土的场地,利用美规评判场地类别更为安全;对于大部覆盖层为砂层,十几二十米砂层以下直接为基岩或接近基岩场地,美规的计算方法对等效剪切波速有很大的提高,增加值为 55~86 m/s。对于覆盖层很薄的软土场地(如 YKQ14),美规方法计算的等效剪切波速更大,增加值为 588 m/s。美规使用 30 m 等效剪切波速所反映出的场地软硬程度和岩性变化情况比 20 m 时更安全、更可靠。

(3) 本文认为,尽管考虑 25 m、30 m 内的平均波速可能对于福州地铁 6 号线沿线常见地表深度 20 m 以下存在软弱夹层的特点有所帮助,但是由于沿线软弱土层的深度、厚度的变化,特别是埋深范围较大的砂层时有夹淤泥,简单的根据固定的等效剪切波速计算深度不能很好的反映福州地铁 6 号线沿线软土场地情况,这对于地震反应分析不利,应加以研究。

参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB17741-2005:工程场地地震安全性评价[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [2] 邱海容. 泉州市区场地土层剪切波速特征[J]. 西部探矿工程,2006,18(1):135-137.
- [3] 刘红帅,郑桐,齐文浩,等. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(7):1142-1149.
- [4] 董菲蕃,陈国兴,金丹丹. 福建沿海 3 个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系,岩土工程学报[J]. 2013,35(增刊 2):145-151.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2016:建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [6] 周大鹏,姜慧,吴彬. 填海场地软弱夹层的地震响应特征分析[J]. 华南地震,2017,37(2):48-52.
- [7] 黄雅虹,吕悦军,兰景岩等工程场地分类中等效剪切波速计算深度问题的讨论[J]. 地震地质,2010,32(2):312-319.
- [8] 蔡辉腾,余建和,陈金友. 福州市区场地类别划分的初步研究[J]. 福建建筑,2008(11):63-65.